

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**CFD-моделирование
автономных осевых турбин
турбонасосных агрегатов ЖРД
в ANSYS CFX**

Электронные методические указания

САМАРА
2012

УДК СГАУ: 621.438.001.2

Составители: **Сулинов Александр Васильевич,**
Шаблий Леонид Сергеевич

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Фалалеев

CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий. - Электрон. текстовые и граф. дан. (2,0 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей: построение геометрической модели, наложение расчётной сетки, создание модели, её решение и анализ результатов.

Методические указания предназначены для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302 «Ракетные двигатели» (ГОС-2), изучающих дисциплину «САЕ-системы в механике жидкостей и газов» в 5 семестре, для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «САЕ-системы в механике жидкостей и газов» в 5 семестре, для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Исследование рабочего процесса ракетных двигателей и энергетических установок» в А-семестре.

Методические указания разработаны на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Содержание

Введение	4
Создание геометрической модели (CAD-модели) турбины	6
Создание сеточной модели турбины	23
Создание расчётной модели	28
Поиск решения.....	36
Анализ результатов расчёта	40
Библиографический список	47

Введение

В настоящее время вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics – CFD) становится всё более популярным инженерным инструментом. Это обусловлено такими её качествами, как формальная простота постановки задачи и независимость методики её решения от рабочего процесса исследуемого узла. То есть, освоив методику решения простых задач, инженер может переходить к более сложным, реалистичным задачам, повысив квалификацию только в области нового способа задания граничных условий или параметров счёта. В данных методических указаниях приведены рекомендации для практического освоения CFD-пакета ANSYS CFX на примере расчёта одноступенчатой автономной осевой турбины турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя.

Для автономных осевых турбин ТНА ЖРД характерны следующие особенности: высокие степени понижения давления (их часто называют *высокоперепадными* турбинами); автономная турбина является малорасходной; при значительном повышении давления скорость течения газа становится сверхзвуковой; наличие парциального подвода характерно для многих автономных турбин ТНА ЖРД; автономную турбину ТНА ЖРД всегда выполняют в виде активной ступени.

Процесс расчёта состоит из пяти основных этапов:

1. **Создание геометрической модели (CAD-модели) турбины.** В ANSYS CFX реализована методика расчёта трёхмерных расчётных зон. Поэтому моделирование турбины выполняется в трёхмерной постановке в ANSYS Design Modeler.

2. **Создание сеточной модели турбины** на базе геометрической модели. Разбиение твёрдотельной 3D-модели на ячейки производится в сеткогенераторе ANSYS Meshing.
3. **Создание расчётной модели** из сеточной путём наложения расчётных условий. В первую очередь, это набор уравнений, которые требуется решать. Для задач теплопроводности – это одно соответствующее уравнение, для потоков жидкости – уравнение неразрывности и моментов количества движения по трём осям. Если есть модель турбулентности, добавляются ещё уравнения и так далее. Кроме того, чтобы задача стала определена, нужно наложить «входные данные» – условия на элементы, характеристики потоков в которых известно. Например, в задаче определения тепловых потоков в твёрдой пластине, входными данными являются значения температур на соответствующих гранях крайних ячеек. Эти условия называются *граничными*. Кроме граничных условий требуется ещё и задание начальных параметров в каждой ячейке внутри расчётной области. Это так называемые *начальные условия*.
4. **Поиск решения.** На данном этапе производится отыскание таких значений параметров в каждой расчётной ячейке, чтобы вся расчётная зона имела максимально верные уравнения потоков. В начальный момент решения эти уравнения скорее всего, не выполняются, потому что начальные условия задаются с большой погрешностью. Методами численного решения уравнений, система находит параметры, при которых все уравнения выполняются. Такое решение называется *сошедшимся*.
5. **Анализ результатов расчёта.** «Сырым» результатом расчёта является сетка, в которой найдено сошедшееся решение. Естественно для удобного анализа результаты представляют в виде графиков, цветных или векторных полей распределения параметров, линий тока, изоповерхностей параметров, числовых значений параметров в заданных областях.

Далее каждый этап описан подробно на примере расчёта одноступенчатой автономной осевой турбины ТНА ЖРД.

Создание геометрической модели (CAD-модели) турбины

Для CAD-моделирования турбины необходимы исходные данные, отражающие полную геометрическую форму проточной части, которые были получены в результате проектного расчёта турбины [1]. На рисунке 1 представлены геометрические параметры проточной части исследуемой турбины: меридионального сечения, а также профилей проточной части соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК).

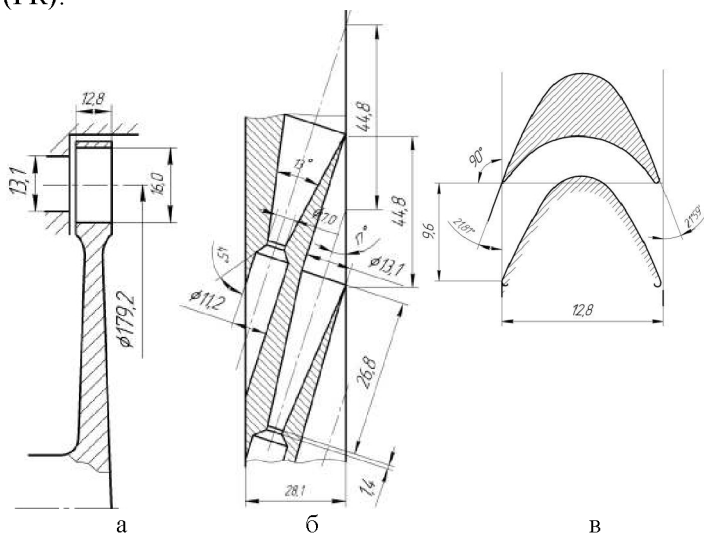


Рисунок 1 - Схема исследуемой турбины и геометрические параметры её проточной части: меридионального сечения (а) и профилей СА (б) и РК (в).

В таблице 1 приведены основные геометрические параметры исследуемой турбины.

Создание геометрической модели выполняется в системе CAD-моделирования ANSYS Design Modeler, встроенной в систему ANSYS Workbench.

Шаг 1. Запуск ANSYS Workbench (рисунок 2) из меню программ:

Пуск -> Программы -> ANSYS 14.0 -> Workbench

Таблица 1 - Геометрические параметры исследуемой турбины

№	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение параметра
1 Турбина				
1	Средний диаметр турбины	D_{cp}	мм	179,2
2 Сопловой аппарат				
2.1	Диаметр выходного сечения канала конической части	d_a	мм	13,1
2.2	Диаметр минимального сечения сопла	d_{min}	мм	7,0
2.3	Ширина венца соплового аппарата	b_c	мм	28,1
2.4	Степень парциальности	ε	-	0,311
2.5	Шаг сопел	t_c	мм	44,8
2.6	Число конических сопел	z_c	-	5
3 Рабочее колесо				
3.1	Высота лопатки рабочего колеса во входном сечении	$h_{\kappa 1}$	мм	16,0
3.2	Высота лопатки рабочего колеса в выходном сечении	$h_{\kappa 2}$	мм	16,0
3.3	Ширина решетки лопаток рабочего колеса	b_{κ}	мм	12,8
3.4	Угол установки профиля лопатки в решетке рабочего колеса	γ_{κ}	град	90
3.5	Шаг решетки рабочего колеса	t_{κ}	мм	9,54
3.6	Число лопаток рабочего колеса	z_{κ}	-	59

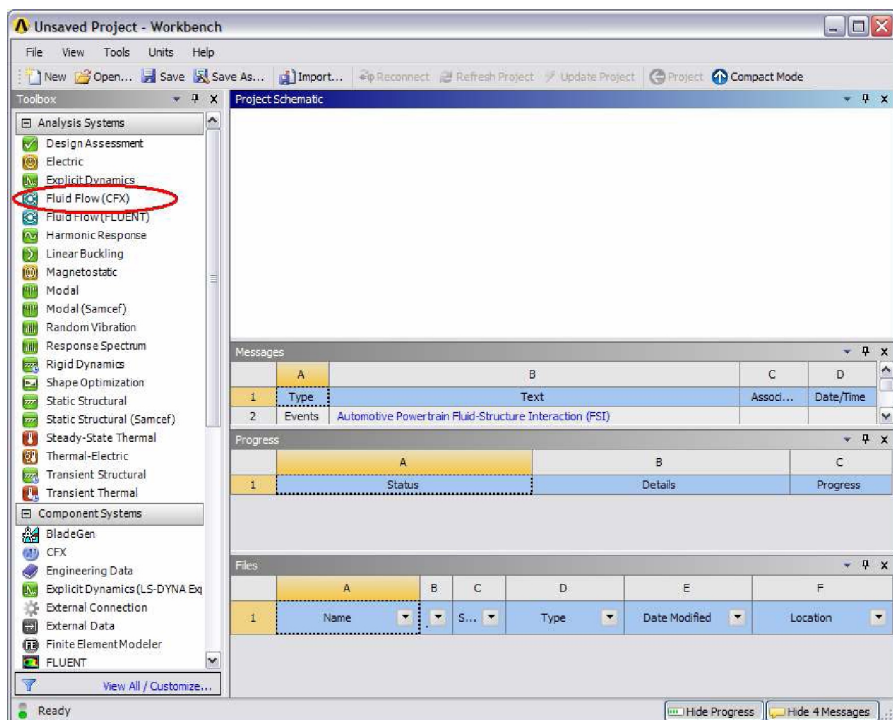
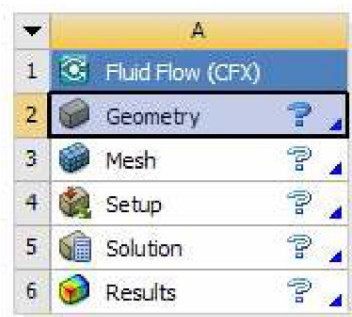


Рисунок 2 - Окно ANSYS Workbench при запуске

Шаг 2. Добавить в пустой проект Workbench систему газодинамического анализа *Fluid Flow (CFX)*, вытянув её на белое поле проекта из левого списка (см. рисунок 2).

Шаг 3. Запустить систему CAD-моделирования, дважды щелкнув на блоке *Geometry* (рисунок 3). При этом откроется Design Modeler, в первом окне которого (рисунок 4) нужно выбрать в качестве единиц измерения длины миллиметры.



Fluid Flow (CFX)

Рисунок 3 - Система
газодинамического анализа
Fluid Flow (CFX)

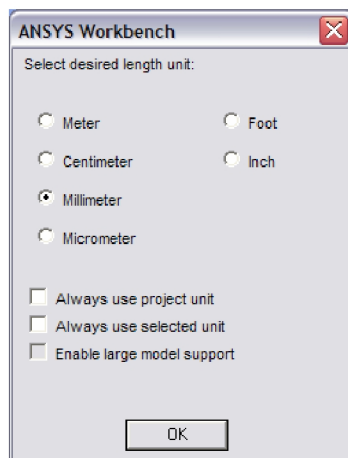


Рисунок 4 - Выбор единиц измерения
Design Modeler

Шаг 4. Создать новую плоскость для моделирования канала СА. Для этого нажать кнопку New Plane (📐) на панели инструментов, выставить её параметры как показано на рисунке 5 и нажать кнопку Generate (⚡). Выбор базовой плоскости осуществляется в три этапа: сначала нужно щелкнуть на поле значения Base Plane, чтобы появились кнопки Apply/Cancel (применить/отменить), затем выбрать нужную плоскость в дереве проекта и нажать кнопку Apply.

Plane	Plane4
Sketches	1
Type	From Plane
Base Plane	YZPlane
Transform 1 (RMB)	Rotate about Global X
<input type="checkbox"/> FD1, Value 1	17 °
Transform 2 (RMB)	Offset Global X
<input type="checkbox"/> FD2, Value 2	89,6 mm
Transform 3 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

Рисунок 5 - Параметры плоскости сечения
канала СА

Шаг 5. Перейти во вновь созданную плоскость, щелкнув по ней правой кнопкой мыши в списке дерева проекта и выбрав пункт 📐 Look at («взглянуть на ...»).

Шаг 6. Включить режим эскизирования - перейти на вкладку Sketching (в левом нижнем углу окна дерева проекта).

Шаг 7. Выполнить эскиз сопла как показано на рисунке 6, используя инструмент Polyline. Сначала эскиз выполняется по произвольным размерам, все размеры и ограничения будут наложены на следующих этапах. Для завершения выполнения команды Polyline нужно нажать правую кнопку мыши и выбрать опции Open End (завершить открытый контур) или Closed End (завершить замкнутый контур). Также для черчения можно многократно использовать команду Line.

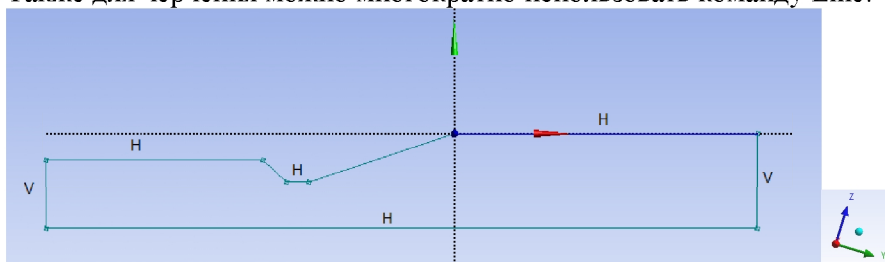









Рисунок 6 - Эскиз канала СА

Шаг 8. Если в процессе черчения не были правильно наложены все автоматические ограничения (см. рисунок 6), то их необходимо наложить вручную, перейдя на вкладку Constraints, и выбирая  Horizontal или  Vertical.

Шаг 9. Обозначить размеры эскиза как показано на рисунке 7, перейдя на вкладку Dimensions. Большинство размеров можно проставить с помощью инструмента  General (общий размер). Также можно пользоваться инструментами  Horizontal и  Vertical. Для задания угла лучше пользоваться инструментом  Angle. Ошибочно установленный размер можно отменить, нажав кнопку  Undo.

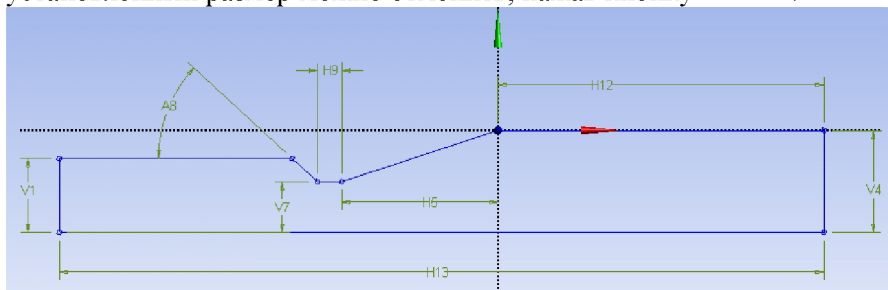



Рисунок 7 - Простановка размеров

Шаг 10. Задать значения размеров (рисунок 8).

Шаг 11. Выполнить вращение созданного эскиза, используя операцию  **Revolve**. В ней необходимо задать ось вращения (Axis), указав горизонтальную линию эскиза и нажав Apply. Для завершения операции нужно нажать Generate (⚡). В результате должно получиться тело вращения - элемент канала СА (рисунок 9).

[-] Dimensions: 8		
<input type="checkbox"/> A8	45 °	
<input type="checkbox"/> H12	80 mm	
<input type="checkbox"/> H13	160 mm	
<input type="checkbox"/> H5	26,8 mm	
<input type="checkbox"/> H9	1,4 mm	
<input type="checkbox"/> V1	5,6 mm	
<input type="checkbox"/> V4	6,55 mm	
<input type="checkbox"/> V7	3,5 mm	

Рисунок 8 - Значения размеров

[-] Details of Revolve1		
Revolve	Revolve1	
Base Object	Sketch1	
Axis	Apply	Cancel
Operation	Add Material	
Direction	Normal	
<input type="checkbox"/> FD1, Angle (>0)	360 °	
As Thin/Surface?	No	
Merge Topology?	Yes	

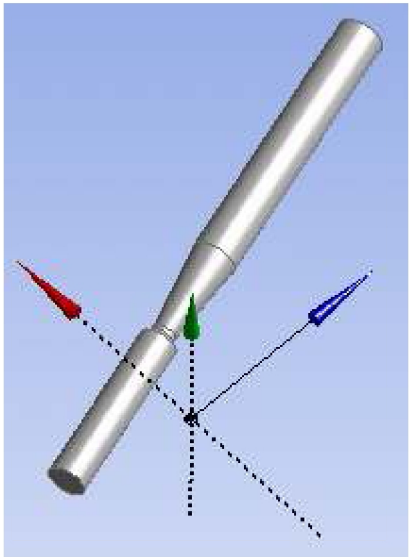


Рисунок 9 - Параметры операции Revolve и её результат

Шаг 12. Создать тело вращения (Create->Primitives->Bend) с параметрами, указанными на рисунке 10.

<input checked="" type="checkbox"/> Details of Bend1	
Bend	Bend1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	-14 mm
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	1
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0)	360 °
<input type="checkbox"/> FD15, Radius (>0)	105 mm
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	28 mm
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	50 mm
As Thin/Surface?	No

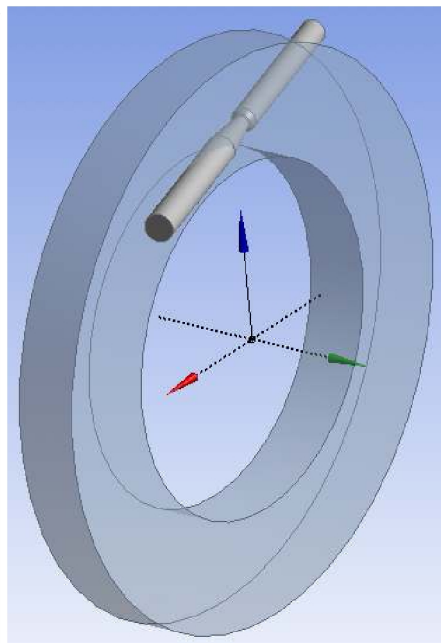


Рисунок 10 - Тело вращения Bend в режиме Frozen

Шаг 13. Выполнить булеву операцию пересечения (Create->Boolean) с параметрами, указанными на рисунке 11. В качестве тел-инструментов (Tool Bodies) нужно указать одновременно оба тела, удерживая клавишу Ctrl.

Boolean	Boolean1
Operation	Intersect
Tool Bodies	2 Bodies
Preserve Tool Bodies?	No
Intersect Result	Intersection of All Bodies

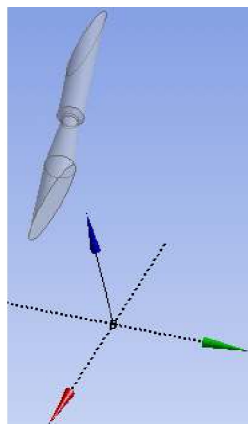


Рисунок 11 - Булева операция пересечения Intersect

Шаг 14. Выполнить операцию копирования кругового массива (Create->Pattern) с параметрами, указанными на рисунке 12. В качестве копируемого тела (Geometry) нужно указать сопло, а в качестве оси - глобальную ось Z.

Pattern	Pattern1
Pattern Type	Circular
Geometry	1 Body
Axis	Selected
<input type="checkbox"/> FD2, Angle	28,65 °
<input type="checkbox"/> FD3, Copies (>0)	4

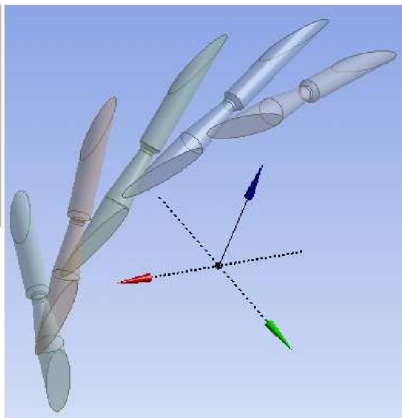


Рисунок 12 - Операция копирования кругового (Circular) массива

Шаг 15. Создать тело вращения (Create->Primitives->Bend) с параметрами, указанными на рисунке 13.

Details of Bend2	
Bend	Bend2
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	0,375 mm
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	1
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0)	360 °
<input type="checkbox"/> FD15, Radius (>0)	89,2 mm
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	0,75 mm
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	30 mm
As Thin/Surface?	No

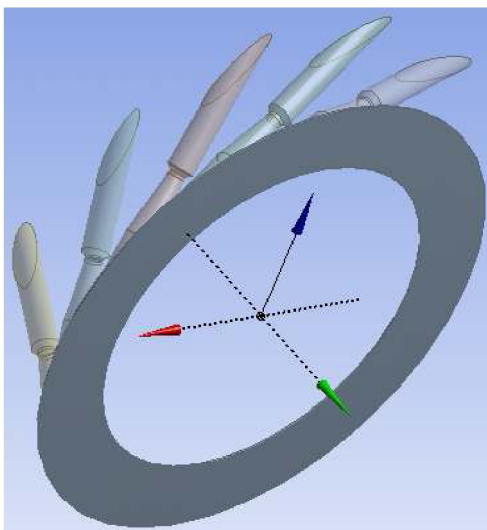


Рисунок 13 - Создание тела вращения Bend

Шаг 16. Создать тело вращения (Create->Primitives->Bend) с параметрами, указанными на рисунке 14.

Details of Bend6	
Bend	Bend6
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	-38 mm
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	1
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0)	360 °
<input type="checkbox"/> FD15, Radius (>0)	115 mm
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	20 mm
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	30 mm
As Thin/Surface?	No

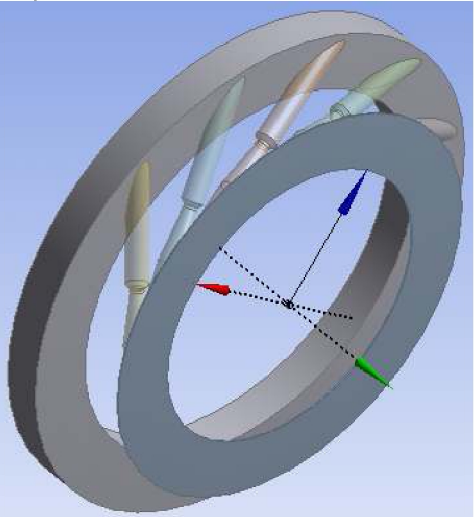


Рисунок 14 - Создание тела вращения Bend

Шаг 17. Чтобы соединить вместе все каналы СА, необходимо «разморозить» (Tools->Unfreeze) замороженные каналы сопел. Выбирать тела для разморозки можно из списка тела дерева проекта (рисунок 15), удерживая Ctrl, или Shift.

Details of Unfreeze1	
Unfreeze Feature	Unfreeze1
Bodies	5
Freeze Others?	No

7 Parts, 7 Bodies

✓ Solid

✓ Solid

✓ Solid

✓ Solid

✓ Solid

✓ Solid

✓ Solid

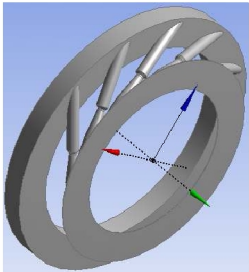


Рисунок 15 - Операция Unfreeze

Шаг 18. Торец выхода СА нужно разбить на три кольцевые поверхности, поскольку высота канала РК меньше канала СА (см. рисунок 1). Для этого нужно создать кольцевой канал РК с параметрами, представленными на рисунке 16 в режиме рассечения граней (Imprint Faces).

Details of Bend3	
Bend	Bend3
Base Plane	XYPlane
Operation	Imprint Faces
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	10,75 mm
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	1
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0)	360 °
<input type="checkbox"/> FD15, Radius (>0)	89,2 mm
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	20 mm
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	16 mm
As Thin/Surface?	No

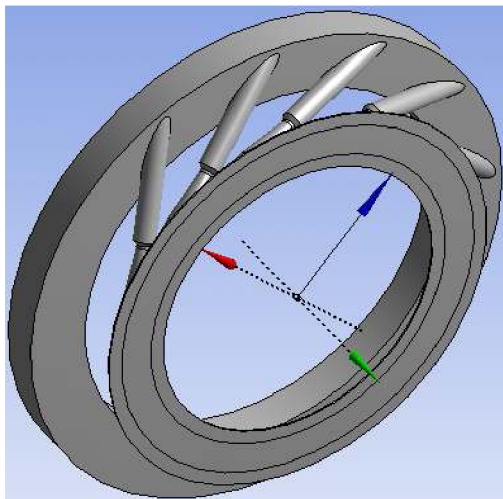


Рисунок 16 - Расечение грани телом вращения Bend в режиме Imprint Faces

Шаг 19. Создать кольцевой канал РК с параметрами, представленными на рисунке 17 в режиме добавления замороженного тела (Add Frozen).

Details of Bend4	
Bend	Bend4
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	10,75 mm
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	1
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0)	360 °
<input type="checkbox"/> FD15, Radius (>0)	89,2 mm
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	20 mm
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	16 mm
As Thin/Surface?	No

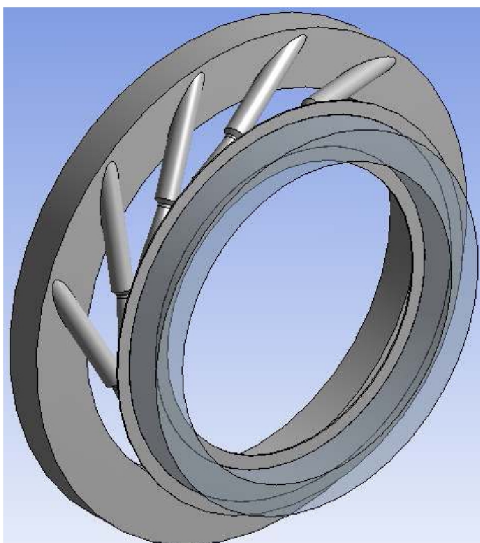





Рисунок 17 - Добавление канала РК в режиме Add Frozen

Следующие несколько шагов направлены на обрезку кольцевого канала РК в окружном направлении с целью создания канала вокруг лишь одной лопатки РК. Кольцевая протяженность такого канала составляет $360/59=6,1^\circ$.

Шаг 20. Создать новую плоскость (✚), используя в качестве базовой плоскость ZX, повернутую относительно глобальной оси Z на половину протяженности канала « $-3,05^\circ$ » (рисунок 18).

Шаг 21. В созданной плоскости создать эскиз, представленный на рисунке 19. Для удобства нужно развернуть модель плоскостью Plane 5 в плоскость экрана: правой кнопкой мыши нажать на Plane 5 в дереве проекта и выбрать пункт  Look at («взглянуть на ...»). Затем нужно создать замкнутый эскиз из четырёх отрезков ( Line) и одной дуги по трём точкам ( Arc by 3 Points). Конечные точки дуги и левая линия должны лежать на осях системы координат (см. рисунок 19).

Plane	Plane5
Sketches	1
Type	From Plane
Base Plane	ZXPlane
Transform 1 (RMB)	Rotate about Global Z
<input type="checkbox"/> FD1, Value 1	-3,05 °
Transform 2 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

Рисунок 18 - Параметры создания плоскости Plane 5

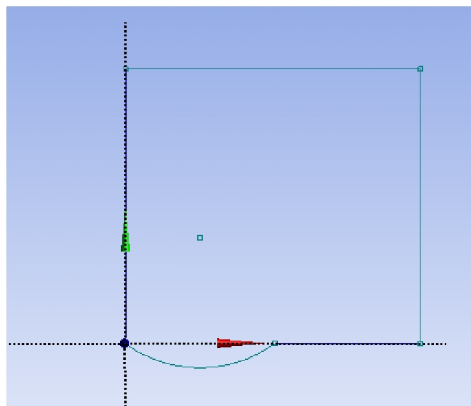


Рисунок 19 - Эскиз в плоскости Plane 5

Шаг 22. Перейти на вкладку Dimensions и расставить в эскизе размеры, как показано на рисунке 20, а затем задать их числовые значения.

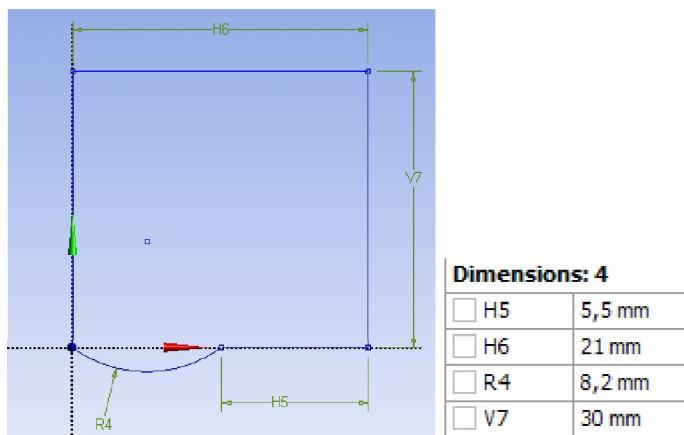



Рисунок 20 - Расстановка размеров в эскизе

Шаг 23. Построить замороженное тело-инструмент для обрезки канала РК путём вытягивания выполненного на предыдущих шагах эскиза с помощью команды  **Extrude**. Параметры команды и результат построения представлены на рисунке 21.

Extrude	Extrude4
Base Object	Sketch3
Operation	Add Frozen
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	120 mm
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes

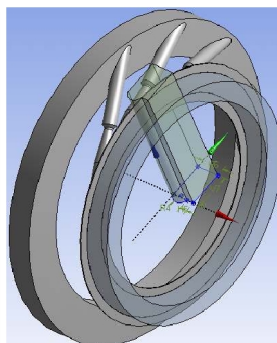


Рисунок 21 - Построение тела-инструмента для обрезки

Шаг 24. Обрезать круговой канал РК с помощью булевой операции (Create -> Boolean), используя в качестве тела-мишени (Target Bodies) кольцевой канал РК, а в качестве тела-инструмента (Tool Bodies) - созданное на предыдущем шаге тело. Кроме того, необходимо включить опцию сохранения тела-инструмента (Preserve Tool Bodies -> Yes).

Boolean	Boolean2
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	Yes

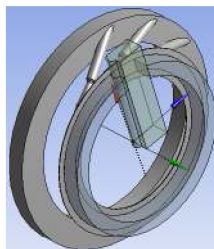


Рисунок 22 - Обрезка канала РК с сохранением тела-инструмента

Шаг 25. Повернуть тело-инструмент вдоль оси Z на 6,1°. Для этого нужно использовать команду Create -> Body Operation с параметрами, представленными на рисунке 22.

Body Operation	BodyOp2
Type	Rotate
Bodies	1
Preserve Bodies?	No
Axis Definition	Selection
Axis Selection	2D Edge
<input type="checkbox"/> FD9, Angle	6,1 °

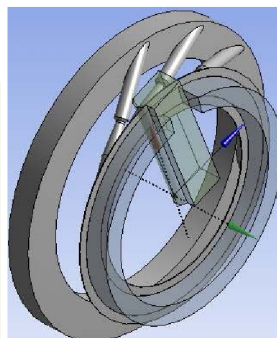


Рисунок 22 - Поворот (Rotate) тела-инструмента относительно оси вращения турбины

Шаг 26. Обрезать канал РК путём булевой операции пересечения (Intersect) (рисунок 23). При выборе тел-инструментов (Tool Bodies) нужно указать одновременно два тела, удерживая Ctrl.

Boolean	Boolean3
Operation	Intersect
Tool Bodies	2 Bodies
Preserve Tool Bodies?	No
Intersect Result	Intersection of All Bodies

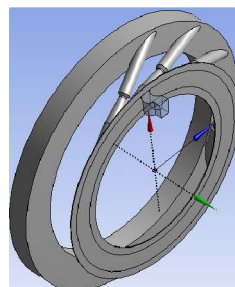



Рисунок 23 - Булева операция пересечения - получения канала РК для одной лопатки

Шаг 27. Создать эскиз сечения лопатки РК в плоскости ZX. Для удобства нужно развернуть плоскость ZX в плоскость экрана ( Look at) и вычертить эскиз, как показано на рисунке 24, используя линии, дуги по центру и дуги по трём точкам.

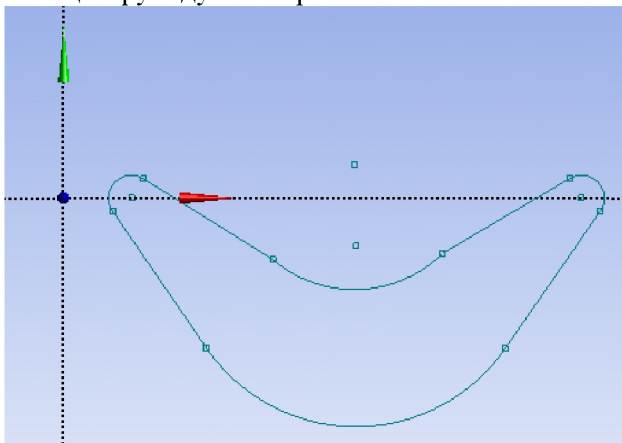


Рисунок 24 - Эскиз сечения лопатки РК

Шаг 27. Образмерить эскиз, как показано на рисунке 25, используя вкладку Dimensions.

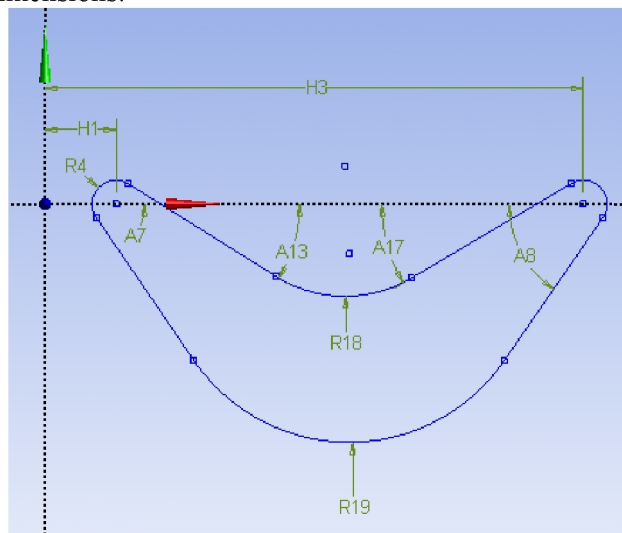



Рисунок 25 - Наложение размеров и ограничений

Шаг 26. Задать ограничение касательности ( **Tangent**) попарно для всех сцепленных элементов эскиза, используя вкладку **Constraint**. Линии эскиза, которые вследствие наложенных размерных и геометрических ограничений теряют возможность двигаться, занимая только одно определённое положение, меняют цвет с бирюзового на синий. В конце данного шага эскиз должен полностью приобрести синий цвет (см. рисунок 25).

Шаг 27. Задать значения всех размеров, как показано на рисунке 26.

Dimensions: 9	
<input type="checkbox"/> A13	40 °
<input type="checkbox"/> A17	40 °
<input type="checkbox"/> A7	68 °
<input type="checkbox"/> A8	68 °
<input type="checkbox"/> H1	2 mm
<input type="checkbox"/> H3	13,8 mm
<input type="checkbox"/> R18	5,5 mm
<input type="checkbox"/> R19	4 mm
<input type="checkbox"/> R4	0,5 mm

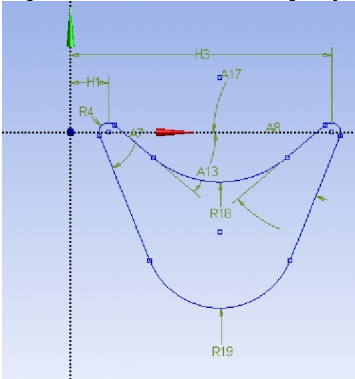



Рисунок 26 - Задание размеров лопатки

Шаг 28. Построить тело лопатки с помощью команды  **Extrude**. Параметры команды и результат построения представлены на рисунке 27.

Extrude	Extrude5
Base Object	Sketch4
Operation	Add Frozen
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	120 mm
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes

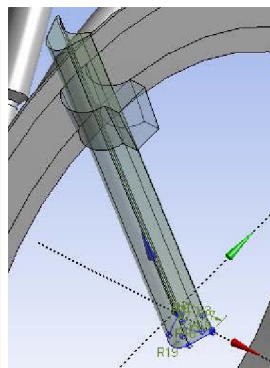


Рисунок 27 - Вытягивание лопатки

Шаг 29. Вырезать лопатку из канала РК с помощью булевой операции вычитания (Substruct), используя в качестве тела-мишени (Target Bodies) кольцевой канал РК, а в качестве тела-инструмента (Tool Bodies) - созданное на предыдущем шаге тело.

Boolean	Boolean4
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	No

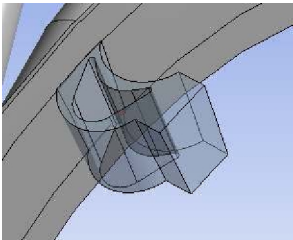
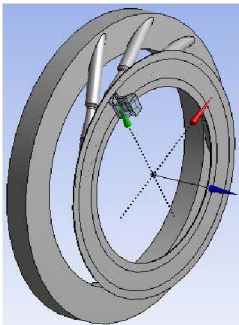


Рисунок 28 - Вычитание лопатки из канала РК

В результате предыдущих шагов были созданы два тела: канал СА и РК. Для удобства их необходимо назвать SA и RK соответственно.

Шаг 29. Раскрыть внизу дереве проекта список деталей и тел (2 Part 2 Bodies), выбрать тело соплового аппарата, и в окне детализации изменить его название в поле Body на SA (рисунок 28). Повторить аналогичные шаги для рабочего колеса.

Body	SA
Volume	4,9407e+005 mm³
Surface Area	1,1973e+005 mm²
Faces	35
Edges	40
Vertices	5
Fluid/Solid	Solid



Body	RK
Volume	1995,2 mm³
Surface Area	1945,4 mm²
Faces	16
Edges	42
Vertices	28
Fluid/Solid	Solid

Рисунок 28 - Задание названий телам

Шаг 30. Завершить работу в Design Modeler, закрыв его. Убедиться, что элемент Geometry имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку (рисунок 29).

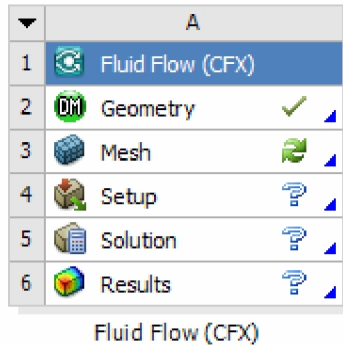


Рисунок 29 - Признак корректного выполнения геометрической модели




Шаг 31 Сохранить проект Workbench, используя кнопку **Save** или **Save As...** При сохранении проекта нужно учитывать, что название файла и путь к нему должны содержать только латинские символы и цифры. Не допускается использовать в названии файла и пути к нему элементы с русскими символами (например, «Новая папка»). По этим же причинам не рекомендуется сохранять проект на рабочем столе, путь к которому включает имя пользователя, которое может содержать неподдерживаемые символы.



Создание сеточной модели турбины

Для CFD-расчёта созданная в предыдущем разделе геометрия турбины должна быть представлена сеткой контрольных объёмов. Разбиение геометрической модели сеткой выполняется в сеткогенераторе.

Шаг 32. Открыть сеткогенератор ANSYS Meshing, дважды кликнув на элементе Mesh проекта Workbench (см. рисунок 29). Откроется окно сеткогенератора с импортированной CAD-моделью.

Перед построением сетки необходимо назвать входные и выходные грани расчётных зон СА и РК соответствующим образом. Поскольку СА и РК соприкасаются друг с другом удобнее это делать поочередно для СА и РК, погасив противоположную зону.

Шаг 33. Погасить зону РК. Для этого нужно в дереве проекта раскрыть список  **Geometry**, нажать правой кнопкой на элемент  **RK**, и нажать  **Hide Body**.

Шаг 34. Назвать зону входа СА. Для этого нужно, находясь в режиме выбора поверхностей () , левой кнопкой мыши выбрать поверхность входа в СА (рисунок 30). Затем вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню и выбрать пункт  **Create Named Selection**. В появившемся окне (рисунок 30) нужно вписать новое название входной границы «inletSA» (без пробела) и нажать ОК.

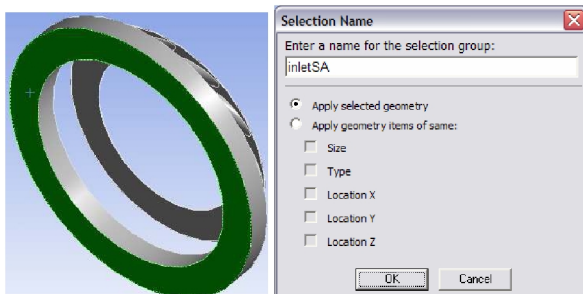


Рисунок 30 - Процесс названия входной границы СА

Шаг 35. Аналогичным образом нужно назвать выходную границу СА. «outletSA» (рисунок 31).

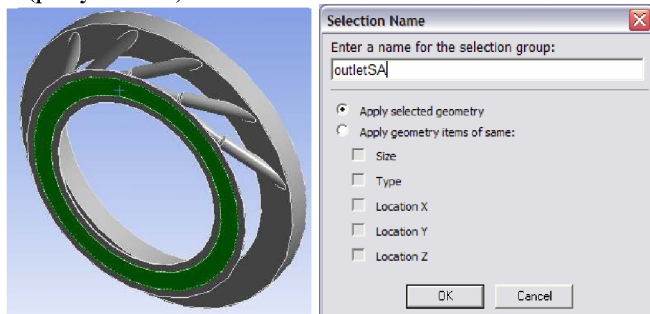




Рисунок 31 - Процесс названия выходной границы СА

Шаг 36. Аналогично шагу 33 погасить зону СА. После этого нужно сделать видимой зону РК. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент геометрии  РК , и нажать  Show Body .

Шаг 37. Аналогично шагу 33 назвать входную зону РК «inletRK», а выходную - «outletRK» (рисунок 32).

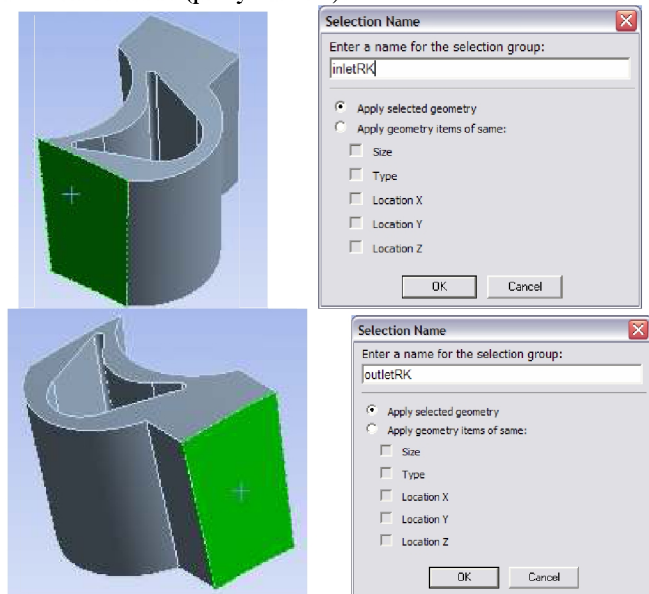


Рисунок 32 - Процесс названия границ РК

Шаг 38. Назвать периодические границы РК. Для этого нужно сначала выделить (удерживая Ctrl) две поверхности, относящиеся к одной стороне и назвать их «up» (рисунок 33)

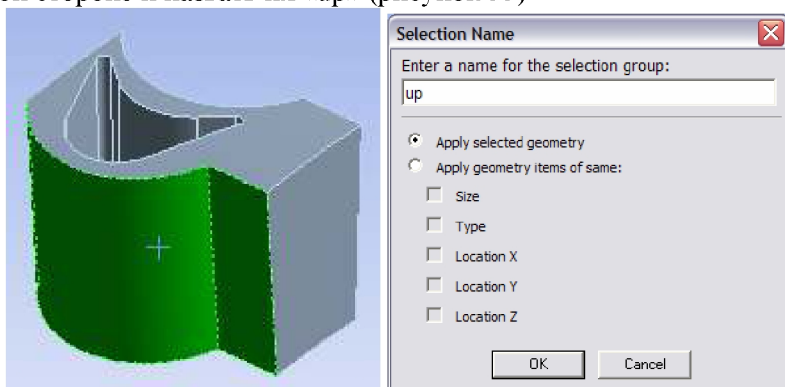


Рисунок 33 - Процесс названия первой периодической границы РК

Шаг 39. Аналогично шагу 38 назвать вторую периодическую границу РК «down» (рисунок 34).

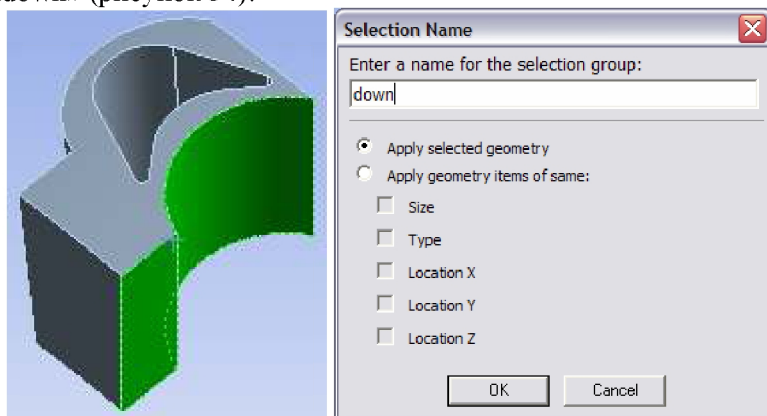






Рисунок 34 - Процесс названия первой периодической границы РК

Шаг 40. Настроить параметры сеткогенерации. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент  Mesh и указать его параметры. На вкладке Sizing задать размеры элементов сетки Relavance Center -> Medium. На вкладке Inflation задать параметры пристеночного слоя Use Automatic Inflation -> Program Controlled (рисунок 35).

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (9,3225e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (9,3225e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,8645e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	1,3263e-003 m

Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Рисунок 35 - Настройка параметров сетки

Шаг 41. Выполнить построение сетки с заданными параметрами. Для этого нужно нажать кнопку  **Update** или  **Generate Mesh**. Процесс построения сетки выполняется пять-десять минут. Признаком удачного завершения является зелёная галочка у элемента  **Mesh** (рисунок 36).

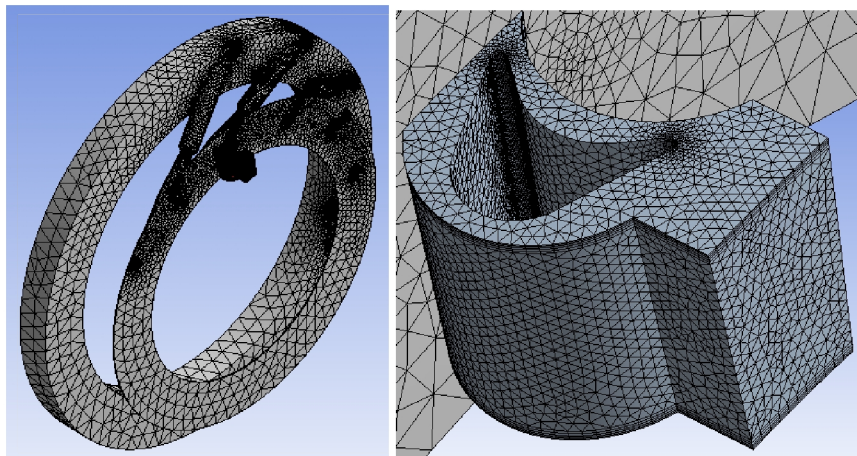










Рисунок 36 - Построенная сетка

Шаг 42. Просмотреть размеры сетки. Для этого раскрыть пункт **Statistics** элемента **Mesh** (рисунок 37). Данная сетка имеет ~300 тыс. элементов и ~85 тыс. узлов.

Шаг 43. После построения сетки нужно закрыть сеткогенератор и сохранить проект. Необходимо также убедиться, что элемент Mesh проекта Workbench имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку (рисунок 37). Иногда сетка бывает обозначена жёлтой молнией, при этом необходимо выполнить её дополнительное обновление, выбрав в контекстном меню элемента Mesh пункт  Update

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	84270
<input type="checkbox"/> Elements	323627
Mesh Metric	None

Рисунок 37 - Статистика сетки

A	
1	 Fluid Flow (CFX)
2	 DM Geometry ✓
3	 Mesh ✓
4	 Setup 
5	 Solution ?
6	 Results ?

Fluid Flow (CFX)

Рисунок 37 - Признак корректного выполнения сеткогенерации

Создание расчётной модели

На основе созданной в предыдущем разделе сетки создаётся расчётная модель путём наложения граничных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя. Основные параметры работы турбины приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2 - Основные режимные параметры одноступенчатой автономной турбины

№	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение параметра
1	Мощность турбины	N_T	$кВт$	500
2	Массовый расход рабочего тела	\dot{m}_T	$кг/с$	0,978
3	Угловая скорость вращения вала турбины (частота вращения вала турбины)	ω (n)	$с^{-1}$ ($об/мин$)	3349 (32000)
4	Давление рабочего тела на входе в сопловой аппарат	P_0^*	$кПа$	5200
5	Температура торможения рабочего тела на входе в сопловой аппарат	T_0^*	$К$	1000
6	Давление рабочего тела на выходе из рабочего колеса	p_2	$кПа$	300
7	Газовая постоянная рабочего тела	R	$Дж/кг \cdot К$	448,2
8	Показатель изэнтропии рабочего тела	k	-	1,254

Далее приведено пошаговое описание задания этих условий моделирования на имеющуюся сеточную модель.




Шаг 44. Запустить препроцессор, дважды щелкнув по элементу Setup (см. рисунок 37).

Далее необходимо задать рабочее тело в соответствии с табл. 2 путём модификации свойств воздуха: молярной массы и теплоёмкости. Молярная масса вычисляется как:

$$M = \frac{8314,3}{R} = \frac{8314,3}{448,2} = 18,5 \text{ кг / моль}$$

Теплоёмкость вычисляется как

$$C_p = \frac{k}{k-1} R = \frac{1,254}{1,254-1} \cdot 448,2 = 2213 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Шаг 45. Переименовать воздух в генераторный газ. Для этого в дереве проекта нужно развернуть список веществ ( **Materials**), найти там воздух с параметрами идеального газа ( **Air Ideal Gas**) и переименовать его в «gg» (генераторный газ), используя пункт ‘ **Rename**’ контекстного меню.

Шаг 46. Модифицировать свойства генераторного газа. Для этого нужно открыть окно параметров рабочего тела, дважды щёлкнув по элементу «gg» левой кнопкой мыши (рисунок 38). На вкладке Basic Settings (основные настройки) не нужно ничего менять, а на вкладке Material Properties (Свойства вещества) нужно задать вычисленные значения молярной массы и теплоёмкости в соответствующие поля. Следует обратить внимание, что все числовые параметры в CFX задаются с точкой в качестве разделителя целой и дробной части. Запятую CFX воспринимает как неверный символ. По завершении задания свойств нужно закрыть окно, нажав OK.

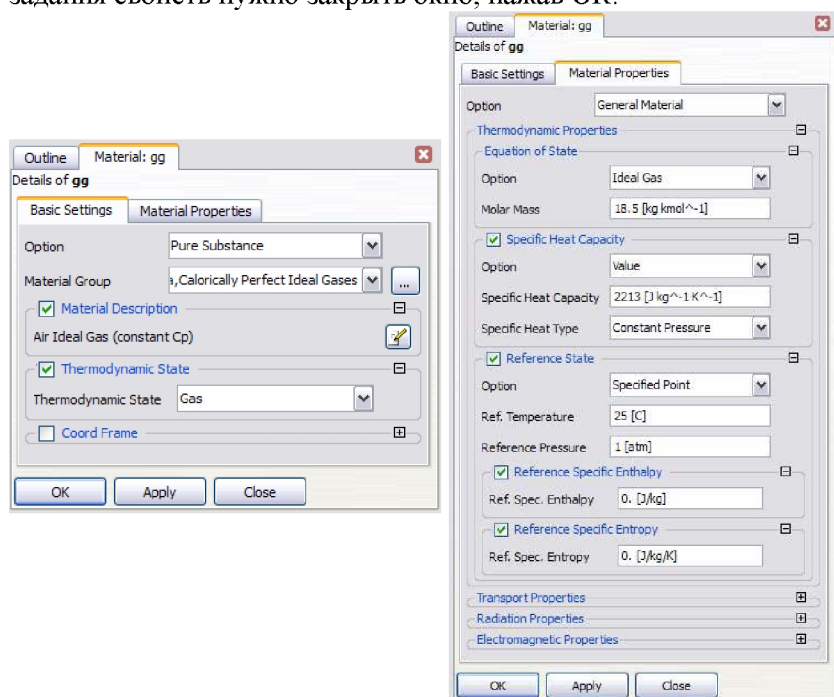


Рисунок 38 - Параметры рабочего тела


Шаг 45. Создать расчётную зону для СА. Для этого выполнить команду главного меню Insert ->  Domain. Затем задать имя новой зоны - «SA» (рисунок 39).



Рисунок 39 - Добавление новой расчётной зоны

Шаг 46. Задать основные параметры (Basic Settings) зоны SA. Для этого на первой вкладке задать размещение (Location) зоны SA - на геометрии CA, выбрав один из двух пунктов. В качестве вещества (Material) выбрать gg (рисунок 40). Reference Pressure установить 0. Нажать Apply.

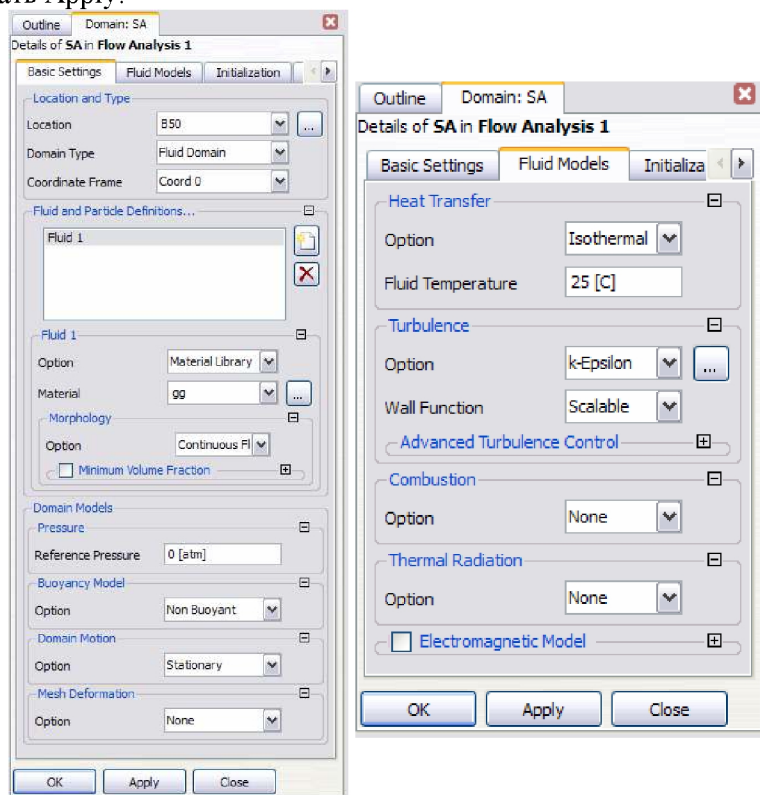




Рисунок 40 - Задание параметров зоны SA

Шаг 47. Задать модели потока (Fluid Models) зоны SA. Для этого нужно перейти на вторую вкладку и там указать параметр теплопереноса (Heat Transfer) - Total Energy. По окончании нажать ОК.

Шаг 48. Аналогичным образом задать добавить зону потока RK, повторяя шаги 45-47. В качестве размещения (Locations) второй зоны указать элемент РК. Кроме того, необходимо задать опцию движения зоны (Domain Motion) - вращение (Rotating) и указать скорость вращения (рисунок 41) В результате проект должен содержать две зоны (рисунок 42).

Шаг 49. Создать интерфейс перехода потока из выхода SA (outletSA) на вход RK (inletRK). Для этого добавить интерфейс Insert ->  Domain Interface, согласиться с его названием «Domain Interface 1» задать в качестве первой стороны (Side 1) - зону SA и границу outletSA, в качестве второй стороны (Side 2) - зону RK и границу inletRK (рисунок 43). Также нужно задать модель смешения потоков (Mixing Model) Stage (ступень).

Шаг 50. Создать входную границу на СА:

Insert ->  Boundary -> in SA.

Назвать границу «inlet» (рисунок 44), задать параметры:

Location -> inletSA,

Total Pressure -> 5200 kPa

Total Temperature -> 1000 K



Рисунок 41 - Создание зоны RK и задание её вращения

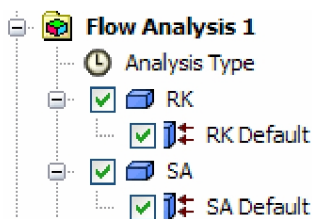


Рисунок 42 - Результат создания расчётных зон SA и RK

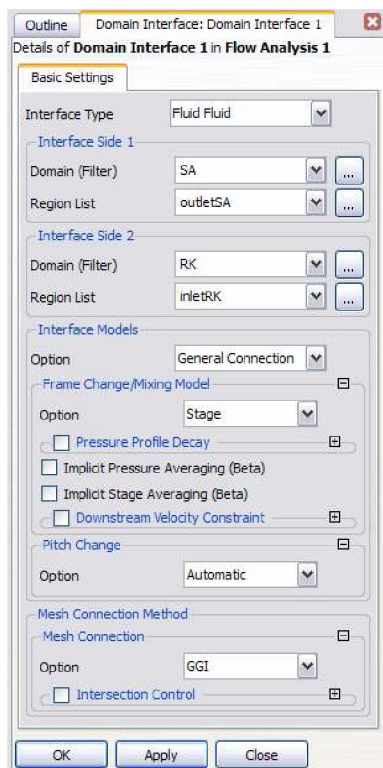


Рисунок 43 - Результат создания расчётных зон SA и RK

Шаг 51. Создать выходную границу на RK: Insert -> Boundary -> in RK. Назвать границу «outlet» (рисунок 45), задать параметры:
Type -> Outlet
Location -> outletRK,
Mass Flow Rate -> 16,6 g/s

Расчёт выполняется в два этапа. На первом этапе на выходе устанавливается граничное условие расхода. Поскольку моделируется только один межлопаточный канал, то расход через него равен:

$$G_1 = \frac{\dot{m}}{z_K} = \frac{0,978}{59} = 0,0166 \text{ кг / с}.$$

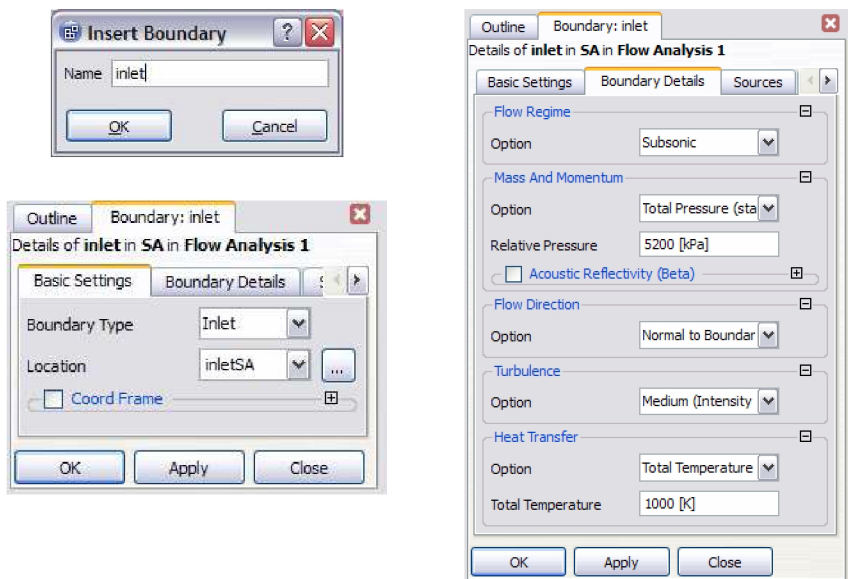


Рисунок 44 - Задание входного граничного условия

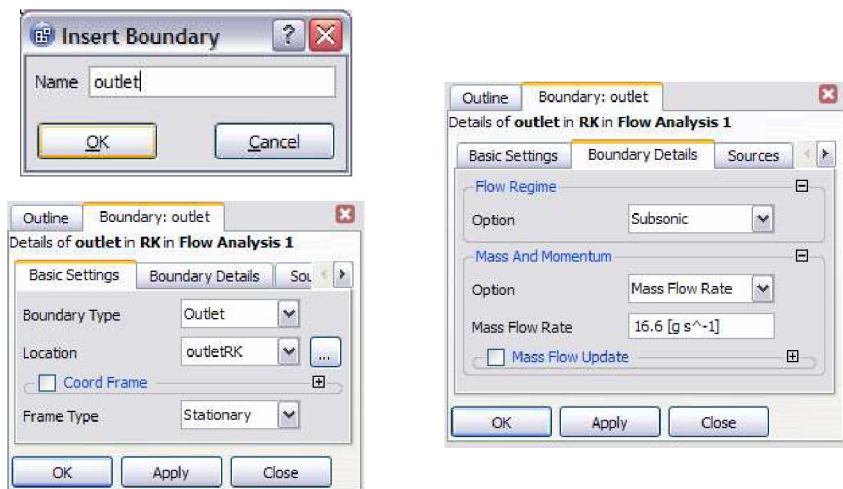


Рисунок 45 - Задание выходного граничного условия

Шаг 52. Создать периодическое граничное условие для РК. Для этого аналогично шагу 49 добавить интерфейс, назвав его «periodic», и задать в качестве сторон Side 1 и Side 2 границы РК «up» и «down», а тип интерфейса установить «Rotational Periodicity» (рисунок 46)

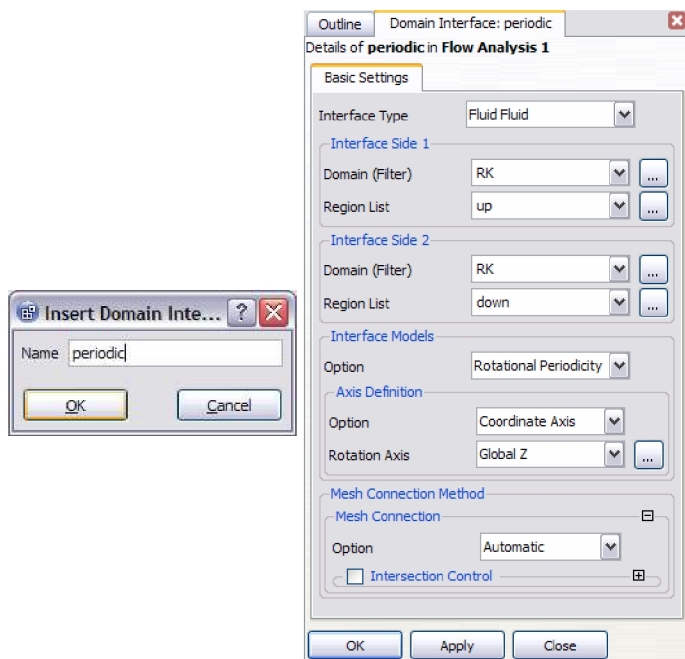



Рисунок 46 - Задание периодического граничного условия

В результате описанных выше манипуляций расчётная модель приобретет вид, представленный на рисунке 47. Далее нужно задать параметры решателя.

Шаг 53. Задать параметры решателя, используя элемент дерева проекта  **Solver Control**. Нужно установить максимальное количество итераций 40 (рисунок 48), этого достаточно для предварительного расчёта.

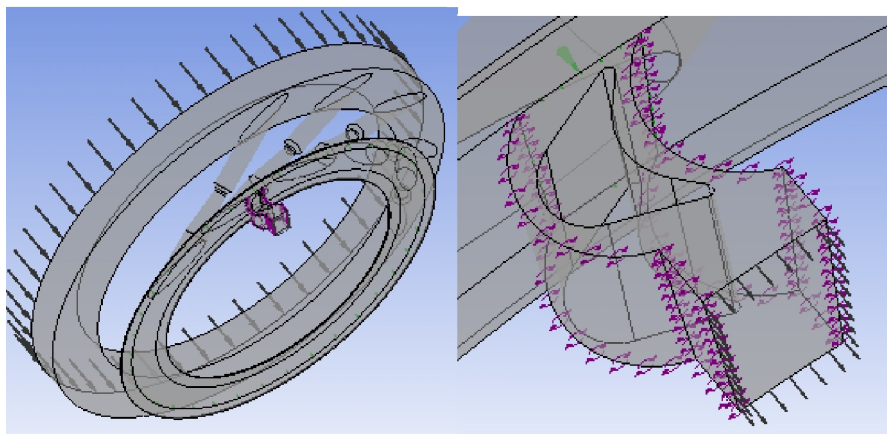


Рисунок 47 - Результат наложения граничных условий

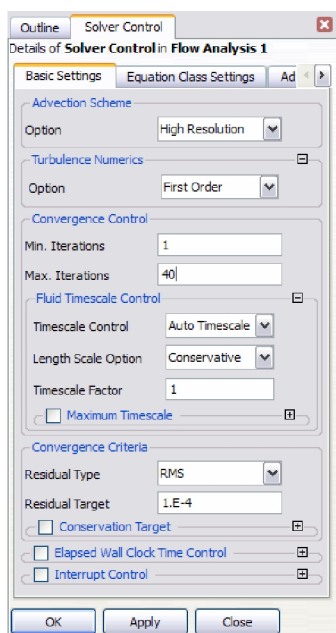
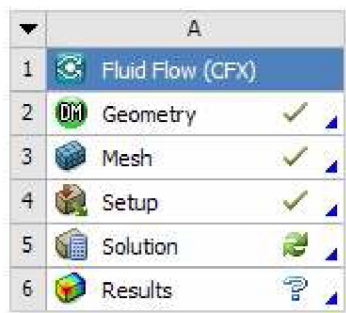


Рисунок 48- Задание параметров решателя



Fluid Flow (CFX)

Рисунок 49 - Результат описания задачи в препроцессоре

Шаг 54. Завершить построение модели, закрыв препроцессор. Проект должен выглядеть как показано на рисунке 49. Проект можно сохранить.

Поиск решения

Отыскание решения поставленной задачи выполняется в так называемом «решателе» (Solver).

Шаг 55. Открыть решатель двойным щелчком на элементе Solution.

Шаг 56. Задать параметры многопроцессорного расчёта: Run Mode -> HP Local Parallel, число параллельных процессов - 2 (рисунок 50), включить галочку Show Advanced Controls и на вкладке Partitioner установить опцию многозонной задачи Multidomain Option -> Coupled Partitioning.

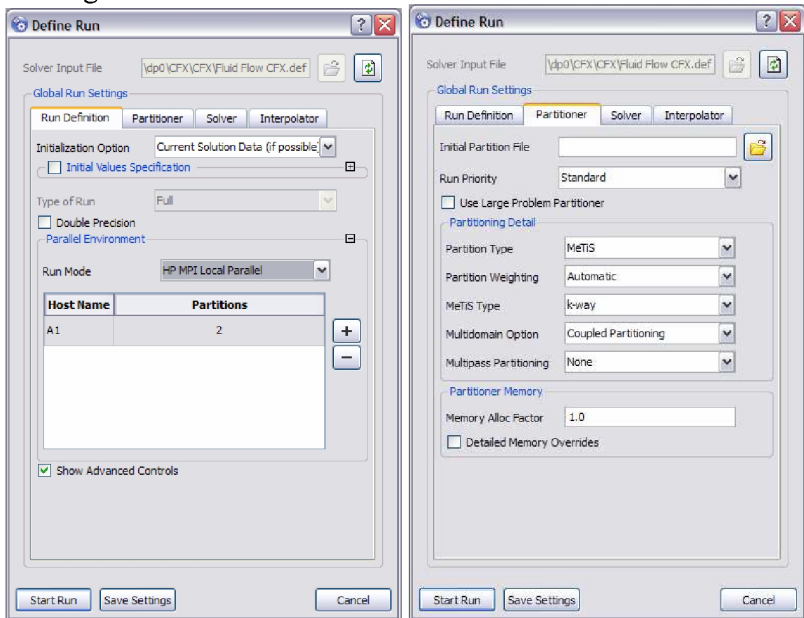


Рисунок 50 - Параметры запуска решателя

Шаг 57. Запустить расчёт, нажав Start Run. Следить за снижением невязок и сообщениями решателя (рисунок 51).

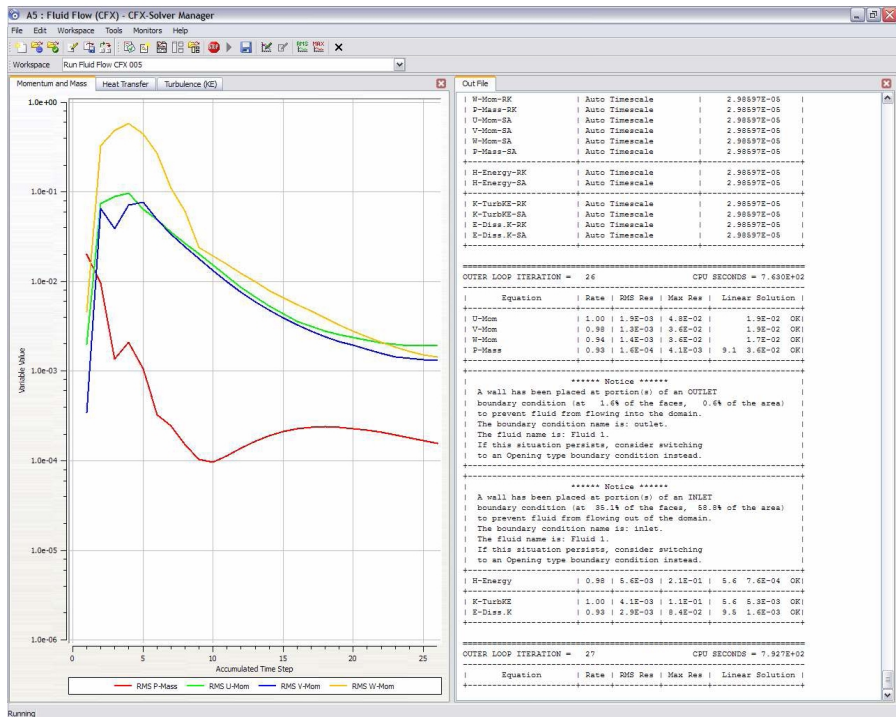


Рисунок 51 - Работа решателя

После выполнения 40 итераций предварительного расчёта решатель остановится. Для выполнения следующего этапа его нужно закрыть, изменить параметры моделирования и продолжить решение.

Шаг 58. Закрыть решатель. Открыть препроцессор (Setup).

Шаг 59. Двойным щелчком открыть граничное условие outlet, на вкладке Boundary Details выставить предварительное значение статического давления 4000 кПа (рисунок 52):

Average Static Pressure -> 4000 kPa.

Подтвердить ввод, нажав ОК.

Шаг 60. Закрывать препроцессор, двойным щелчком открыть решатель и нажать Start Run. Расчёт продолжит выполняться с новыми граничными условиями и параметрами решателя, но с начальными условиями, взятыми из предварительных результатов. Этим достигается устойчивость работы решателя, поскольку запуск решения задачи с условиями типа «давление на входе плюс давление на выходе» запуск обычно затруднён.

Шаг 61. После завершения расчёта необходимо закрыть решатель. Признаком правильного завершения расчёта является зелёная галочка у элемента Solver в проекте Workbench (рисунок 53).

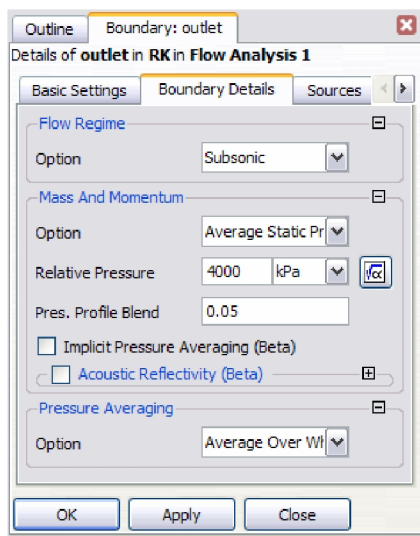


Рисунок 52 - Модификация параметров задачи

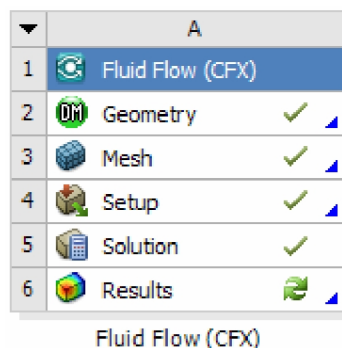


Рисунок 53 - Проект Workbench с верно выполненным расчётом

Шаг 62. Аналогично шагам 59-60 выполнить последовательные расчёты, ступенчато понижая давление на выходной границе:

1. 4000->2000,
2. 2000->1000,
3. 1000->600,
4. 600->300кПа.

На последнем этапе, поскольку он является заключительным, необходимо также повысить максимальное количество итераций до 100 для увеличения точности результатов (рисунок 54). В результате решения картина невязок в окне решателя будет выглядеть как на рисунке 55. Видно, что изменения граничных условий вызывают временные повышения невязок, которые затем выравниваются. Поэтому если делать более резкие изменения граничных условий, например, поставить сразу 300 кПа на выходной границе, расчёт аварийно завершится из-за слишком больших градиентов параметров.

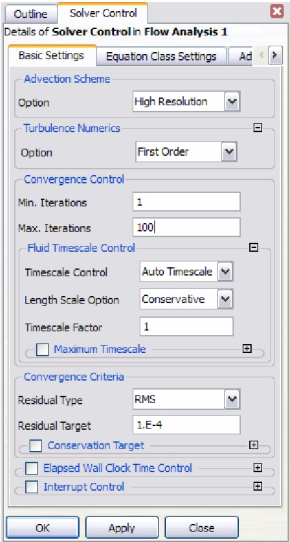


Рисунок 54 - Увеличение максимального количества итераций до 100

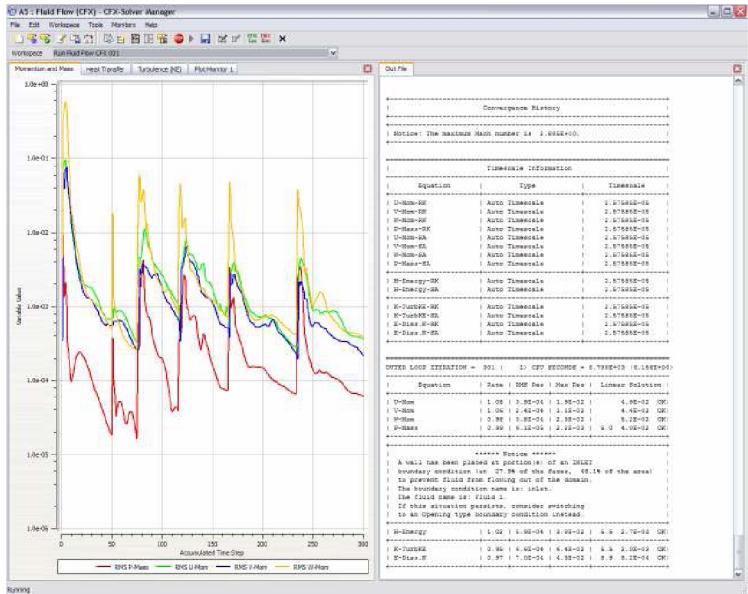



Рисунок 55 - Окно решателя в конце процесса решения

Анализ результатов расчёта

Для анализа результатов расчёта их необходимо представить в виде полей параметров, линий тока, интегральных значений параметров. Эти процедуры выполняются в пост-процессоре. Полученные студентом результаты могут несколько отличаться от приведенных в данном пособии вследствие грубой сетки неполной сходимости расчёта, вызванной временными ограничениями практического занятия. Однако порядки параметров должны быть одинаковыми. В противном случае вероятнее всего расчёт выполнен с ошибкой.

Шаг 63. Запустить пост-процессор двойным щелчком на элементе Results (см. рисунок 53).

Шаг 64. Создать элемент визуализации потока Streamline (линии тока): Insert ->  Streamline. Задать его название и параметры (рисунок 56). Нажать Apply. Просмотреть картину потока (рисунок 57).

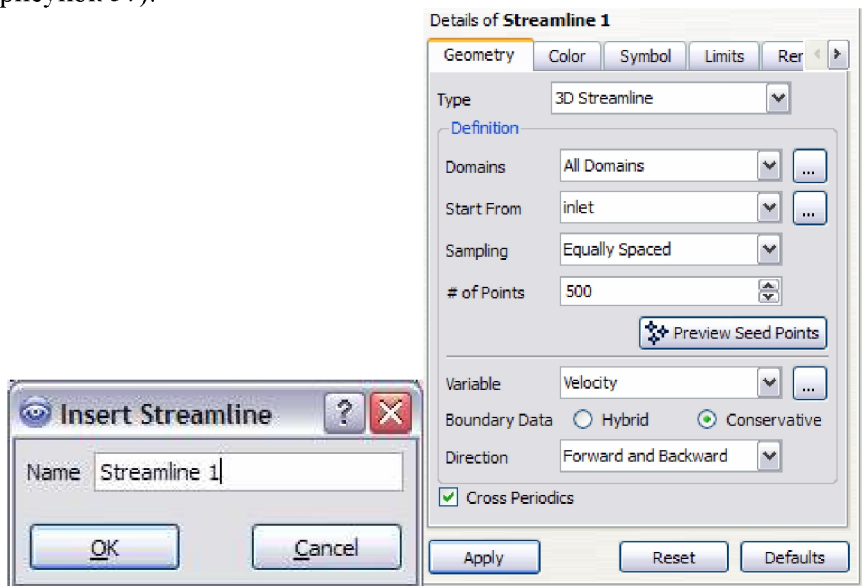


Рисунок 56 - Параметры элемента визуализации Streamline 1

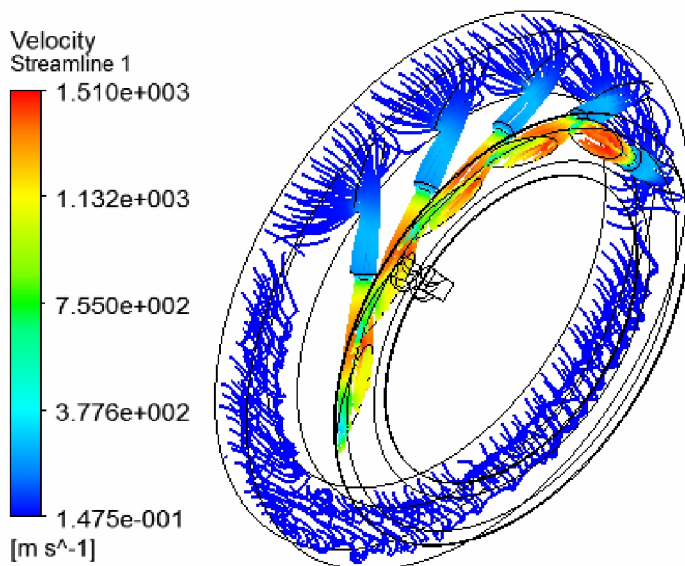




Рисунок 57 - Результат визуализации Streamline 1

Шаг 65. Для лучшего отображения РК можно размножить зону РК. Для этого нужно открыть двойным щелчком элемент  РК в дереве проекта и установить число копий - 59, а также поставить галочку Full Circle (полный круг) для автоматического определения угла поворота копий (рисунок 58). Если включить отображение непроницаемых границ РК, поставив в дереве проекта галочку у элемента  RK Default, то картина приобретёт вид, показанный на рисунке 58.

Шаг 66. Для оценки интегральных параметров потока необходимо перейти на вкладку Calculators и выбрать (дважды щелкнуть) Function Calculator (рисунок 59).

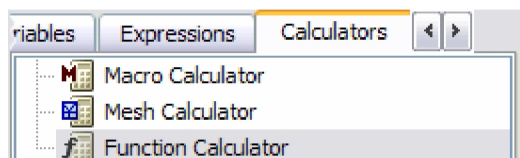


Рисунок 59 - Включение калькулятора функций

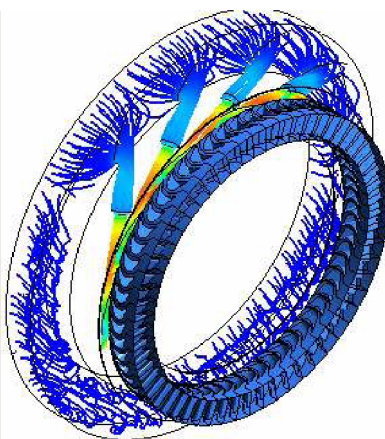
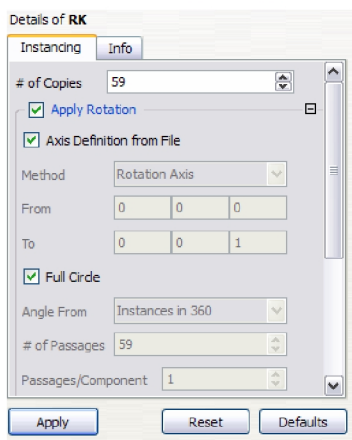
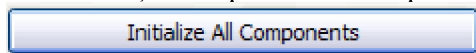


Рисунок 58 - Включение отображения полного РК

Шаг 67. Используя калькулятор, нужно оценить (рисунок 60) значение расхода (massFlow) на входной границе (inlet) и крутящего момента (torque) относительно оси Z на непроницаемых стенках рабочего колеса (RK Default). Следует иметь ввиду, что крутящий момент определяется для одного межлопаточного канала РК, чтобы найти момент на колесе, нужно умножить его на количество лопаток:

$$M_{\text{колеса}} = M_1 \cdot z_k = 1,22 \cdot 59 = 72 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Шаг 67. Для определения углов потока в характерных сечениях турбины необходимо вычислить проекционные составляющие скоростей потока. Для этого нужно перейти на вкладку Turbo (правее Calculators) и проинициализировать значения скоростей (нажать



), а затем опять вернуться на вкладку Calculators.

Шаг 69. Определить среднерасходные (massFlowAve) компоненты скорости для выхода из CA (Domain Interface Side 1): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 61). На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из CA:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{c_{1a}}{c_{1u}} = \arctg \frac{440}{968} = 24^\circ$$

Function Calculator

Function

massFlow

Location

inlet

Case

CFX

Variable

Pressure

Direction

Global

X

Fluid

All Fluids

Results

Mass Flow on inlet

0.884373 [kg s⁻¹]

☒ Clear previous results on calculate
 ☐ Show equivalent expression

Calculate

Hybrid

Conservative

Function Calculator

Function

torque

Location

RK Default

Case

CFX

Variable

Pressure

Axis

Global

Z

Fluid

All Fluids

Results

Torque on RK Default

1.21722 [N m]

☒ Clear previous results on calculate
 ☐ Show equivalent expression

Calculate

Hybrid

Conservative

Рисунок 60 - Определение интегральных параметров потока

Function Calculator

Function

massFlowAve

Location

Domain Interface 1 Side 1

Case

CFX

Variable

Velocity Axial

Direction

Global

X

Fluid

All Fluids

Results

Mass Flow Average of Velocity Axial on Domain Interface 1 Side 1

440.19 [m s⁻¹]

☒ Clear previous results on calculate
 ☐ Show equivalent expression

Calculate

Hybrid

Conservative

Function Calculator

Function

massFlowAve

Location

Domain Interface 1 Side 1

Case

CFX

Variable

Velocity Circumferential

Direction

Global

X

Fluid

All Fluids

Results

Mass Flow Average of Velocity Circumferential on Domain Interface 1 Side 1

967.515 [m s⁻¹]

☒ Clear previous results on calculate
 ☐ Show equivalent expression

Calculate

Hybrid

Conservative

Рисунок 61 - Определение абсолютных скоростей на выходе из СА

Шаг 70. Аналогично шагу 69 определить среднерасходные (massFlowAve) компоненты скорости в относительном движении на входе в РК (Domain Interface Side 2): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 62). На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол входа потока в РК в относительном движении:

$$\beta_1 = \arctg \frac{w_{1a}}{w_{1u}} = \arctg \frac{344}{565} = 31^\circ$$

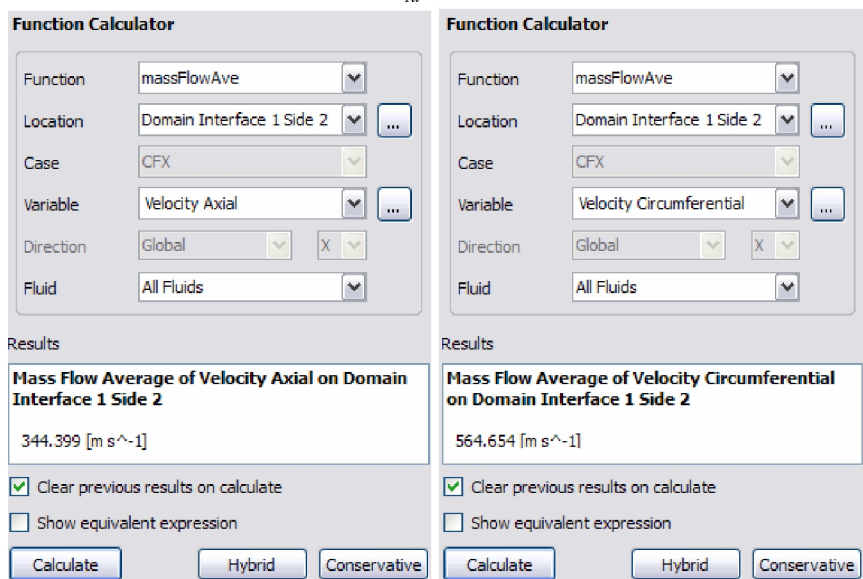


Рисунок 62 - Определение относительных скоростей на входе в РК

Шаг 71. Аналогично шагу 70 определить среднерасходные (massFlowAve) компоненты скорости в относительном движении на выходе из РК (outlet): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 63). «Минус» окружной скорости на выходе соответствует её противоположному направлению в цилиндрической системе координат. На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в относительном движении:

$$\beta_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{w_{2u}} = \arctg \frac{153}{318} = 26^\circ.$$

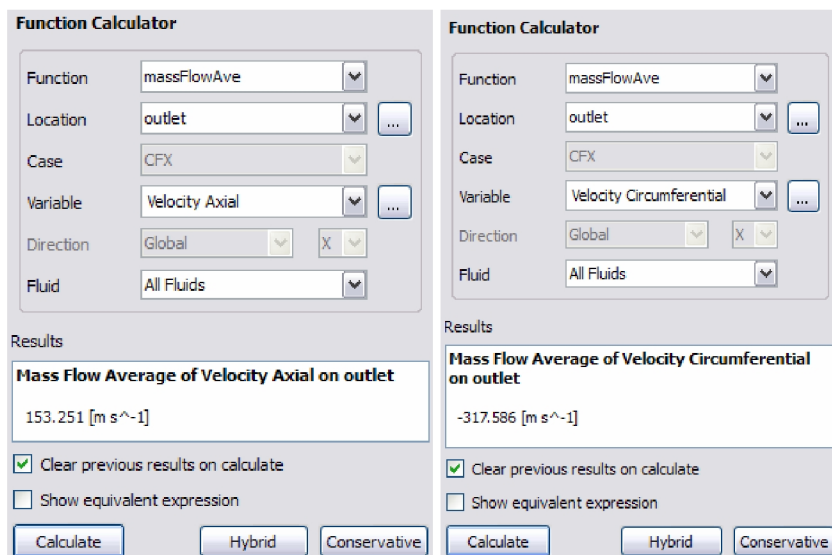


Рисунок 63 - Определение относительных скоростей на выходе из РК

Шаг 72. Аналогично шагу 71 определить среднерасходную окружную (Velocity in Stn Frame Circumferential) компоненту скорости в *абсолютном* движении на выходе из РК (рисунок 64). На основе полученных значений скоростей вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в *абсолютном* движении:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{c_{2u}} = \arctg \frac{153}{19} = 83^\circ.$$

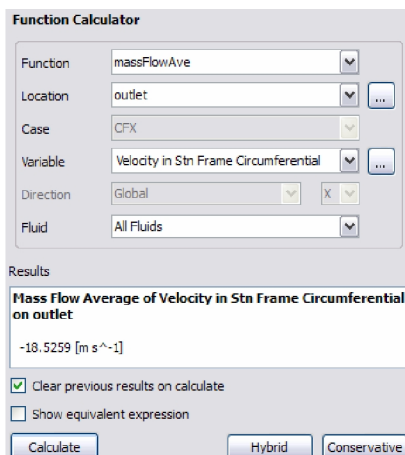


Рисунок 64 - Определение абсолютной окружной скорости на выходе из РК

Шаг 73. Сравнить полученные результаты с имеющимся аналитическим расчётом (рисунок 65) [1].

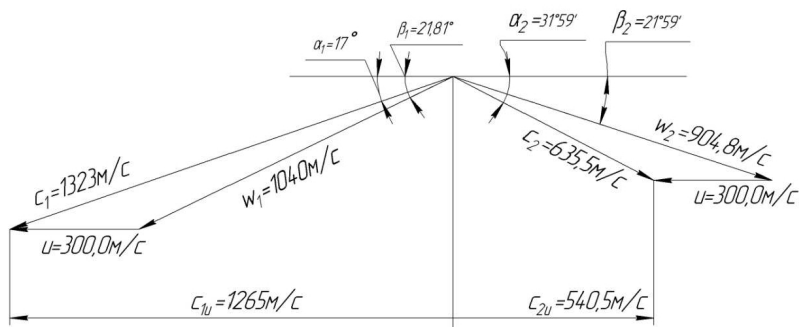


Рисунок 65 - План скоростей исследуемой турбины, полученный аналитическим путём

Различия в значениях являются расчётными ошибками. Их можно уменьшить несколькими способами:

1. Провести большее количество итераций для лучшего сведения расчёта, выставив больший параметр Max Iterations на завершающем этапе расчёта (см. рисунок 54)

2. Увеличить качество сетки. При настройке размеров элементов (см. рисунок 35) использовать размер Fine, а не Medium. Также можно создать дополнительные загущения сетки и пристеночные слои в областях вокруг лопаток и неподвижных стенок турбины.

3. Применить более точную модель турбулентности, например SST вместо k-epsilon (см. рисунок 40). Для модели SST необходимо разрешение пограничных слоёв не менее, чем 10-ю узлами сетки.

4. Более точно задать параметры рабочего тела: заменить константы выражениями или таблицами, более точно задать вязкость и теплопроводность генераторного газа, поскольку в данном расчёте использовались параметры воздуха (см. элемент Transport Properties на рисунке 38).

Пробуя различные комбинации этих подходов можно добиться желаемого улучшения точности расчёта.

Библиографический список

1. Матвеев В.Н., Сулинов А.В. Проектный расчёт одноступенчатых и двухступенчатых автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД: учебное пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2011. - 85 с.